

## БЕЗПИЛОТЕН САМОЛЕТ- МОДЕЛИРАНЕ И УПРАВЛЕНИЕ

Димитър Йорданов, Петър Гецов

*Институт за космически изследвания – Българска академия на науките*

## UNMANNED AIRCRAFT- MODELLING AND CONTROL

Dimitar Jordanov, Petar Getsov

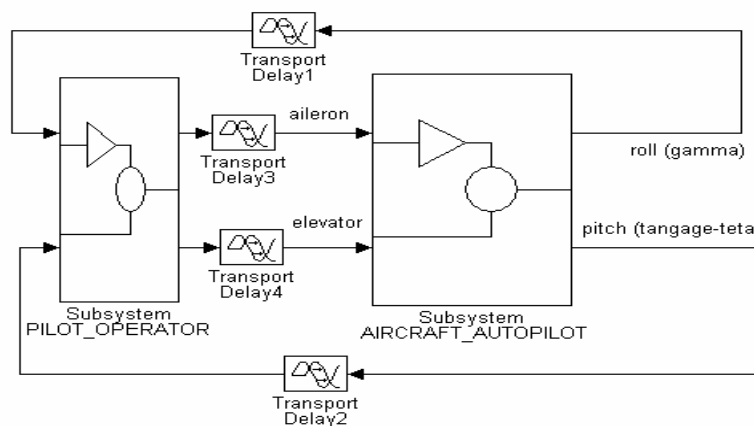
*Space Research Institute – Bulgarian Academy of Sciences*

**Резюме:** Предложен е метод за проверка на идеите за управлението на безпилотен самолет чрез моделиране на контура за управление. Моделите са разработени в “Matlab-Simulink”. Получени са резултати, чрез които се изясняват съществуващи проблеми в контура за управление извън зоната на пряка видимост и са предложени способи за осигуряване на устойчивост на контура при голямо закъснение в системата за дистанционно управление.

В бързо развиващата се област на безпилотната техника управлението е един от сериозните проблеми, от които зависят безопасността на обекти, разположени в зоната на полета и изпълнението на целевите задачи на мисията. Моделирането засега е най надеждния способ за предварително изучаване на проблемите в управлението извън зоната на пряка видимост на самолета. При моделирането и изследването на процесите в контура за управление на безпилотния комплекс се приема, че в пункта за управление пилотът-оператор има информация на монитор за крена и тангажа на самолета подобно на авиохоризонт в кабината на реален самолет и изображение на заснетата повърхност. Това предполага разпределение на вниманието на пилота-оператор подобно на реален полет. Управлението по двата канала се осъществява с отделни ръчки или с един манипулатор от типа “джойстик” независимо по два канала – елерони и кормило за височина. Третият канал – кормилото за направление в полет е поверен само на автопилота и работи като демпфер на рисканието.

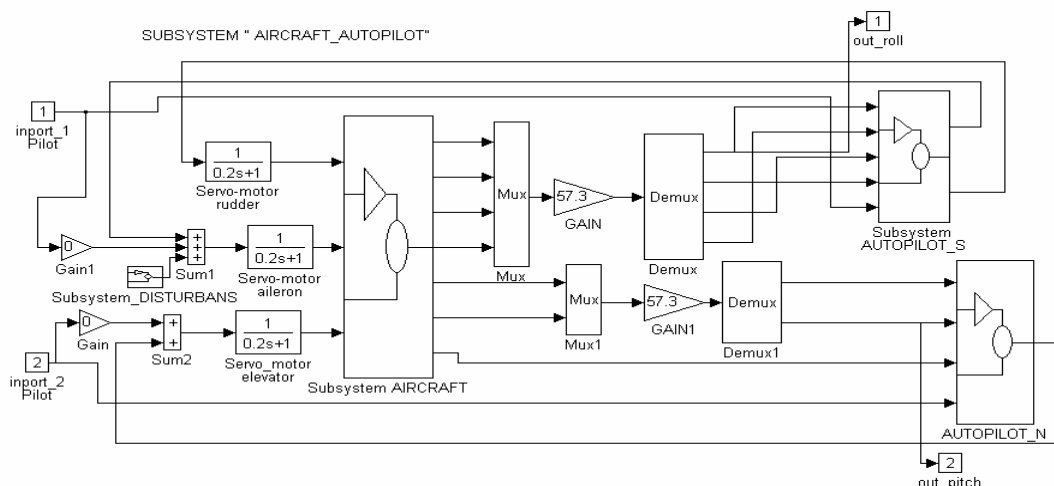
Моделиран е контур за управление с голямо закъснение на сигнала към самолета и от самолета до пункта за управление - общо  $\Delta\tau=1.4s$ , което е близко до данните посочени от други изследователи (4) и съответства на условия на полет извън зоната на видимост. Практиката е установила неустойчивост на контура за ръчно управление при такива полети и опитите за точно пилотиране и даже намеса за корекции по получената информация от апарата са се оказали опасни за полета (5). Моделирането на безпилотния комплекс има за цел да създаде работоспособна база за изследване на проблемите в управлението му.

Общият вид на модела е показан на фиг.1. Всеки блок има няколко нива на подробност.



**Фиг. 1.** Модел на безпилотния комплекс

На фиг. 2 е показана подсистемата "AIRCRAFT-AUTOPILOT"



Фиг. 2. Модел на подсистемата "AIRCRAFT-AUTOPILOT" за комбиниран режим на управление на аппарата с 3 канален автопилот.

Отделните блокове на фигурите 1 и 2 имат следното значение:

- Подсистема "AIRCRAFT" – моделира поведението на самолета в надлъжно и странично движение и връзките между тях, визуализира траекторията и осигурява информация за работата на автопилота;
- Подсистема "DISTURBANS" – симулира смущения по ъгъл на наклона (крен), въведени чрез отклонение на елероните; подобни подсистеми са въведени и за ъглите на рисканието и тангажа ;
- Подсистема "PILOT\_OPERATOR" моделира сензомоторните действия на оператора ;
- Останалите блокове и подсистеми моделират работата на автопилота в надлъжния (AUTOPILOT\_N) и страничния канал (AUTOPILOT\_S) на управлението, а "Transport Delay" – закъснението при работа извън зоната на видимост.

Автопилотът работи по кръстосана схема и е триканален, програмируем от пулта за управление. В канала на кормилото за направление в полет работи като демпфер на рисканието. За автоматично управление на самолета в хоризонтална плоскост автопилотът "получава" от модела информация за наклон (крен), рискание, ъглова скорост на наклона, а за автоматично управление във вертикална плоскост автопилотът работи по сигнали за височината на полета, ъгъла на тангажа и ъгловата скорост на тангажа. Текущите параметри се сравняват с програмните и разликата се нулира при работа в автоматичен режим. Органите за управление се задвижват от три кормилни машини, които са изпълнителни електромеханизми както на автопилота така и на командите на пилота-оператор. Операторът няма задача да работи с кормилото за направление. В модела е реализирана **идея за комбиниран тип управление**, в която операторът за корекции на полета може да се намесва в работата на автопилота без да го изключва. Условно такъв режим се нарича **"управление чрез автопилот"** (командите на оператора се подават в автопилота като зададени параметри по крен и тангаж, които се сумират с програмните).

Автопилотът може да се програмира по курс, наклон, тангаж, вертикална скорост и височина в типови манюври (виражи, завои, набор на зададена височина и снижение до зададена височина). Моделите на оператора в двата канала са елементарни и отчитат най-важните му свойства – закъснение на сензомоторната реакция, зона на нечувствителност и управление по един параметър. Предавателната функция на модела на оператора за управление в затворен контур е от типа  $W(s) = K_{\text{пилот}} e^{-0.3s}$ . При моделиране на действията на оператора се приемат данни от изследвания за пилотируеми самолети (1), (2), (3). Закъснението и коефициентите на усилване са приети като средни стойности - постоянни за симулацията. В действителност те са случайни величини. Проведени са симулации и с пределни коефициенти на усилване на пилота в различни условия за кратко време.

За оценка на функционирането на модела се контролират 18 параметри на полета чрез средствата на визуализация и графика, които предлага продукта "Simulink".

### Резултати от изследването на безпилотния комплекс

Работата с компютърния модел за изследователски цели е целесъобразно да стане в следния ред:

1. По данни за обекта за управление се изчисляват предавателните числа на автопилота по крен и тангаж и съответните ъглови скорости. Предавателните числа на автопилота са определени по

методика от (3) и се коригират по вида на преходните процеси. За конкретния модел автопилотът работи по следните закони:

$$\text{Кормило за височина } \delta_e^0 = 0.77\Delta\vartheta^0 + 0.44\int\Delta\vartheta^0 dt + 0.235\omega_z^{0/s}.$$

$$\Delta\vartheta^0 = \vartheta^0 - \vartheta_{\text{зад}}^0$$

$\vartheta_{\text{зад}}^0$  може да се задава по няколко начина:

$$\vartheta_{\text{зад}}^0 = f(t)$$

$$\vartheta_{\text{зад}}^0 = 0.16\Delta H_{(m)}$$

$$\vartheta_{\text{зад}}^0 = 0.16V_{y(m/s)}$$

$$\vartheta_{\text{зад}}^0 = f_1(t) \text{ - от пилота оператор}$$

$$\text{Елерони } \delta_e^0 = 0.75(\gamma^0 - \gamma_{\text{зад}}^0) + 0.0045\int(\gamma^0 - \gamma_{\text{зад}}^0) dt + 0.0045\omega_x^{0/s}$$

$\gamma_{\text{зад}}^0$  може да се задава по няколко начина:

$$\gamma_{\text{зад}}^0 = f(t);$$

$$\gamma_{\text{зад}}^0 = 0.6(\psi^0 - \psi_{\text{зад}}^0); \quad \psi_{\text{зад}}^0 = f(t);$$

$$\gamma_{\text{зад}}^0 = f_2(t) \text{ - от пилота оператор};$$

$$\text{Кормилото за направление работи по ъглова скорост на рисканието } \delta_n^0 = 0.02\omega_y^{0/s}$$

2. Настройва се блок "Subsystem AIRCRAFT\_AUTOPILOT" с характеристиките на устойчивост и управляемост за обекта и определените предавателни числа за автоматично управление около масовия център. В случая са заложили данни за малък безпилотен самолет с маса 50kg при следните характеристики:

$$C_{y^\alpha} = 4.72, C_{z^\beta} = -0.31, C_{z^{\delta H}} = -0.14, m_z^{C_y} = -0.13, m_x^\beta = -0.058, m_y^\beta = -0.12,$$

$$m_z^{\omega_z} = -8.99, m_x^{\omega_x} = -0.66, m_y^{\omega_y} = -0.1, m_x^{\omega_y} = -0.11, m_y^{\omega_x} = 0.11, m_z^{\dot{\alpha}} = -4.3,$$

$$m_z^{\delta B} = -1.09, m_x^{\delta e} = -0.24, m_y^{\delta H} = -0.07, m_x^{\delta H} = -0.01,$$

$$S_{кр} = 2.14\text{m}^2; l_{кр} = 5.06\text{m}; b_{кр} = 0.42\text{m}; I_x = 21.4\text{kg}\cdot\text{m}^2; I_y = 29.3\text{kg}\cdot\text{m}^2; I_z = 12.4\text{kg}\cdot\text{m}^2$$

Височина на полета е от 10 m до 500 m и скорост 100 km/h. Самолетът е спирално неустойчив. Честотата на колебания в надлъжния канал е около 0.9 Hz, а относителният коефициент на затихване на колебанията е 0.83.

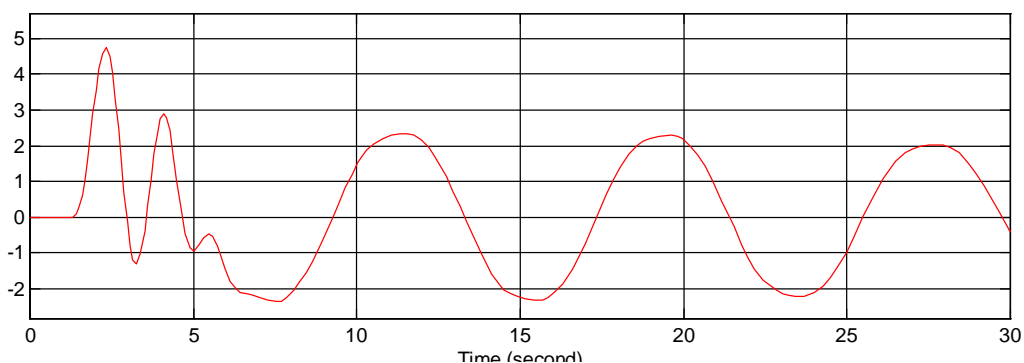
3. При изключена програма на автопилота и отсъствие на закъснение в предаването на сигналите се настройва моделът на пилота–оператор за парирание на смущения по крен и тангаж. Целта е да се определят критичните коефициенти на усилване за пилота в зоната на видимост.

4. При изключена програма на автопилота и закъснение в предаването на сигналите се настройва моделът на пилота–оператор за парирание на смущения по крен и тангаж. Целта е да се определят критичните коефициенти на усилване за пилота извън зоната на пряка видимост.

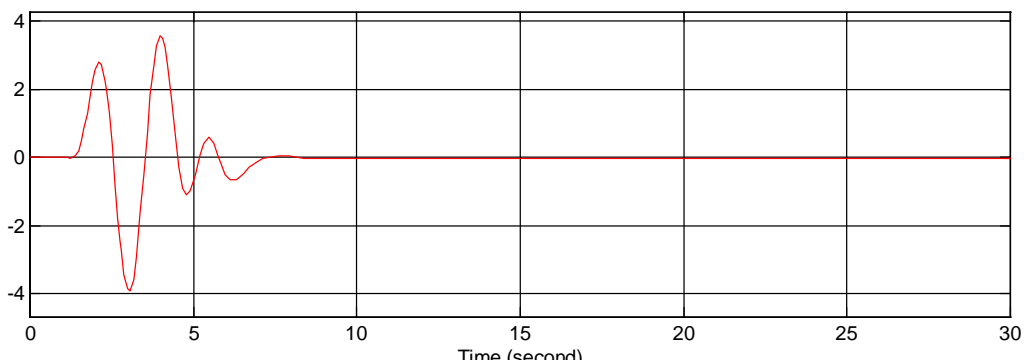
5. При същата настройка на модела се включва програма на автопилота, за да се реализира комбиниран режим на управление при парирание на смущенията. Проверява се наличието или отсъствието на устойчивост.

6. Проверява се изпълнението на криволинеен полет от автопилота, с намеса на оператора за корекции в комбиниран режим в зоната на видимост и извън зоната на видимост. Анализира се взаимодействието на пилота с автопилота и възможностите за ръчно пилотиране извън зоната с пряка видимост. Въвеждат се корекции в системата за управление за осигуряване на устойчив и безопасен полет.

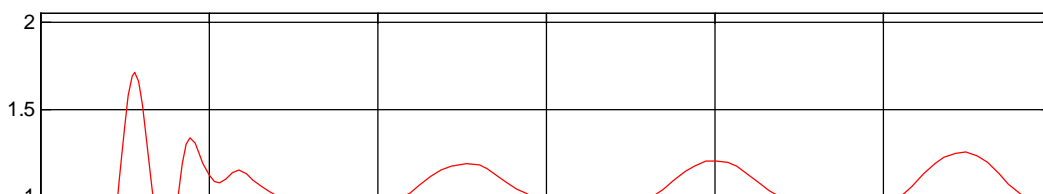
На фиг. 3-а и 4-а са показани преходни процеси след въведени смущения по крен и тангаж и парирание на смущенията от оператора в режим на ръчно управление и условия на полета **извън зоната на видимост**, далече от оператора (закъснение на сигналите в контура за управление 0.7s на входа и 0,7s на изхода от оператора). Автопилотът е изключен и операторът подава команди директно на кормилните машини, разполагайки с пълния диапазон за управление. Пилотът получава сигнали на монитора за изменение на крена и тангажа в градуси и на изхода от манипулатора реализира отклонение в градуси. Моделите на пилота–оператор по крен и тангаж са настроени с коефициенти на усилване близки до критичните, които в конкретните условия са  $K_{кр\_тангаж} = 0.452$ ;  $K_{кр\_крен} = 0.38$ . Симулираните процеси са на границата на колебателна устойчивост. Под тях за сравнение са приведени същите преходни процеси, но с включен автопилот, при който движенията на лоста за управление се въвеждат от оператора като зададени параметри по крен и тангаж в автопилота - комбиниран режим на управление "чрез автопилот" (фигури 3-б, 4-б).



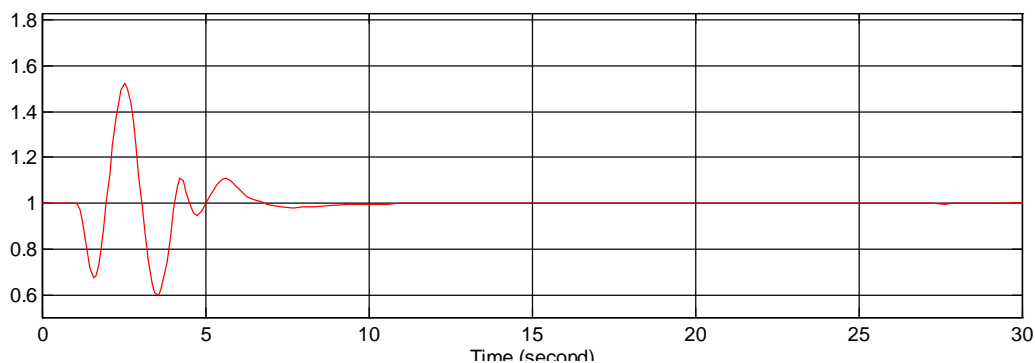
**Фиг. 3-а.** Наклон на самолета при опит да се парира смущение от пилота при ръчно пилотиране с критичен коефициент на усилване  $K_{кр\_крен} = 0.452$ . Смущението е въведено между  $t=1...4s$  с кормило за направление в диапазона  $\delta_H = \pm 15^\circ$  и предизвиква разклащане на самолета по крен. Контурът работи при закъснения, характерни за полет извън зоната на пряка видимост. Автопилотът е изключен. Процесът е на границата на колебателната устойчивост за контура за управление.



**Фиг. 3-б.** Наклон на самолета при опит да се парира смущение по крен в комбиниран режим от пилота по принципа "чрез автопилот" с коефициент на усилване  $K_{пилот\_крен} = 0.452$  (критичен за условия на ръчно пилотиране). Автопилотът е включен. Контурът работи при закъснения, характерни за полет извън зоната на пряка видимост. Автопилотът изпреварващо парира колебанията. Критичният коефициент на пилота в комбиниран режим е около 2.205.



**Фиг. 4-а.** Нормално претоварване на самолета при опит да се парира смущение по тангаж от пилота с критичен коефициент на усилване  $K_{кр\_тангаж} = 0.38$ . Автопилотът е изключен, полетът е извън зоната на видимост, закъснението в контура за управление е 1.4s (по 0.7s на входа и изхода в модела на пилота). Процесът е на границата на колебателна устойчивост.



**Фиг. 4-б.** Нормално претоварване на самолета при опит да се парира смущение по тангаж (в диапазона  $\pm 10^\circ$ ) от пилота в **комбиниран режим** с коефициент на усилване  $K_{\text{пилот_тангаж}} = 0.38$ , по принципа “чрез автопилот”. Автопилотът е включен, полетът е извън зоната на видимост, закъснението в контура за управление е 1.4s (по 0.7s на входа и изхода в модела на пилота-оператор). Процесът е устойчив. Критичният коефициент на пилота в комбиниран режим е около 0.84.

Отсъствието на колебателна неустойчивост показва **положителната роля на автопилота и на комбинирания режим** по принципа “чрез автопилот” като едно от средствата за решаване на проблемите на управлението. Автопилотът поради оптимизираната структура на командите си и бързодействието успява да парира сам смущенията и осигурява “по-комфортни” условия за работа на пилота-оператор.

Дори при много груби действия на оператора по крен (с отклонение на лоста за управление в диапазона  $\pm 45^\circ$  по синусоидален закон) при комбиниран режим на управление “чрез автопилот”, самолетът се колебае по крен не повече от  $\pm 45^\circ$ . Дори ако операторът задържи лоста за управление на пулта в крайно положение за команда по крен, самолетът остава в стабилизирани от автопилота наклон от  $+45^\circ$  или  $-45^\circ$ . В ръчен режим на пилотиране при такава команда самолетът се върти непрекъснато около надлъжната ос и спираловидно се снижава. Операторът в комбиниран режим на управление извън зоната на видимост не може да обърне самолета по гръб дори при най-груби команди и грешки. Това е много важен фактор на безопасността на полета в полза на управлението в комбиниран режим по принципа “чрез автопилот”.

Анализът на моделираните ситуации показва, че е целесъобразно да се въведе ограничение за оператора в канала за управление по тангаж защото самолетът трябва да се предпази от излизане на околкритични ъгли на атака при груби действия на оператора с лоста за управление. В комбиниран режим на управление по тангаж по принципа “чрез автопилот”, в район извън зоната на видимост, основната работа в надлъжното управление се извършва от автопилота. За корекции по тангаж на оператора са достатъчни  $\pm 5^\circ$ . Това прави безопасен полета и по ъгъл на атака. Ако операторът задържи в крайно положение лоста “по тангаж-на кабриране”, самолетът не излиза на критичен ъгъл на атака и на разрушаващи претоварвания. Отклонение от  $-5^\circ$  на лоста (на кабриране) в автопилота се въвеждат като програма за увеличаване на тангажа с  $5^\circ$  и дават възможност на оператора да приведе самолета в набор на височина с вертикална скорост от  $V_y = 2.5$  m/s. Ако операторът продължително време колебае лоста за управление по синусоидален закон в ограничения диапазон от  $\pm 5^\circ$ , самолетът повтаря колебанията, но без да излиза на критични режими по ъгъл на атака и претоварване.

Управлението в комбиниран режим “чрез автопилот” с ограничения на оператора обезопасява полета от колебателна неустойчивост и излизане на критични режими, но предявява много високи изисквания към надеждността на автопилота. Полет без автопилот извън зоната на пряка видимост е невъзможен.

Чрез моделиране е проверена възможност за корекции на програмираната траектория чрез команди от оператора с определена продължителност и постоянно отклонение на манипулатора при включен автопилот (комбиниран режим).

**Най-важният извод от моделирането** е, че за точно пилотиране в ръчен режим при полети извън зоната на видимост, пилотът-оператор следва да намали коефициента си на усилване около 3...4 пъти по двата канала спрямо коефициентите на усилване при пилотаж в условия на пряка видимост, за да се запази устойчив контура за ръчно управление. Това е много трудна задача за оператора, който е лишен от всякаква друга информация, освен индикация за крен и тангаж. Практически е невъзможно операторът бързо да се адаптира.

Целесъобразно е при полет извън зоната на видимост да се лети в комбиниран режим на управление като операторът въвежда само корекции със задържане на лоста в крайни положения за определено време и да не се стреми към точно пилотиране. Такъв тип управление се оказва най-

добро за изменение на траекторията в хоризонтална плоскост, когато пилотът не се намесва за корекции в надлъжното управление (тази задача е поверена само на автопилота). В такава постановка е по-целесъобразно от оператора да се следи не крена и тангажа, а траекторията на полета в хоризонтална плоскост и да въвежда корекции чрез отклонения на манипулатора за определено време. Командата от оператора е с продължителност на управляващите импулси, в зависимост от резултата, който се следи по визуализираната траектория върху карта на местността (или по изображението получено от камерите на борда). Проверени са подобни режими в типови пространствени маньоври. Подобен тип “препрограмиране на автопилота от оператора” по курса е предвидено в съществуващите съвременни автопилоти за полети на безпилотни самолети извън зоната на пряка видимост.

Проверена е идея за управление от пилота-оператор в условия на полет извън зоната на пряка видимост по принципа, условно наречен “**управление чрез модел**”, при който реалният апарат повтаря движенията на модел, управляван в затворен контур без закъснение от оператора. Моделираните ситуации потвърждават работоспособността на такъв метод и резултатите са - устойчиво управление при всички условия без промяна на навиците за ръчно пилотиране на оператора.

#### **Литература**

1. Б ю ш г е н с Г., Р. С т у д н е в. Динамика продольного и бокового движения. “Машиностроение”, Москва, 1979г.
2. Д е н и с о в В., В. О н и щ е н к о. Инженерная психология в авиации и космонавтике, изд. Машиностроение, 1972г.
3. М и х а л е в И., Б. О к о е м о в, И. П а в л и н а, М. Ч и к у л а е в, Н. Э й д и н о в. “Системы автоматического управления самолетом – методы анализа и расчета.”Машиностроение”, Москва 1971.
4. Р о с т о п ч и н В. Безпилотные авиационные системы. Интернет - AVIA.RU - Авторское.
5. Ч и с т я к о в Н. Что такое ДПЛА (рассуждения). Интернет - AVIA.RU - Авторское.